

10.12.2004

日 本 国 特 許 庁
JAPAN PATENT OFFICE

RECD 13 JAN 2005

WIPO PCT

別紙添付の書類に記載されている事項は下記の出願書類に記載されている事項と同一であることを証明する。

This is to certify that the annexed is a true copy of the following application as filed with this Office.

出 願 年 月 日 2 0 0 4 年 1 0 月 2 6 日
Date of Application:

出 願 番 号 特 願 2 0 0 4 - 3 1 1 4 5 8
Application Number:
[ST. 10/C] : [J P 2 0 0 4 - 3 1 1 4 5 8]

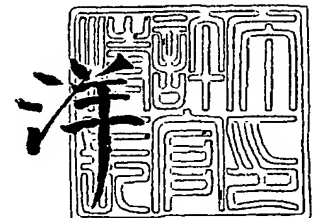
出 願 人 独 立 行 政 法 人 産 業 技 術 総 合 研 究 所
Applicant(s):

PRIORITY DOCUMENT
SUBMITTED OR TRANSMITTED IN
COMPLIANCE WITH
RULE 17.1(a) OR (b)

2 0 0 4 年 1 2 月 1 日

特許庁長官
Commissioner,
Japan Patent Office

小 川



BEST AVAILABLE COPY

【書類名】 特許願
【整理番号】 2004001967
【あて先】 特許庁長官 殿
【国際特許分類】 G01N 21/00
G01R 27/26

【発明者】
【住所又は居所】 茨城県つくば市東 1 - 1 - 1 独立行政法人産業技術総合研究所
つくばセンター内
【氏名】 川手 悦男

【特許出願人】
【識別番号】 301021533
【氏名又は名称】 独立行政法人産業技術総合研究所
【代表者】 吉川 弘之
【電話番号】 029-862-6155

【国等の委託研究の成果に係る記載事項】 平成 1 6 年度経済産業省「地域中小企業支援型研究開発（機器開発型） ゴーグル光学系を用いた深さ可変 A T R 測定器の研究開発」委託研究、産業活力再生特別措置法第 3 0 条の適用を受ける特許出願

【手数料の表示】
【予納台帳番号】 220262
【納付金額】 16,000円

【提出物件の目録】
【物件名】 特許請求の範囲 1
【物件名】 明細書 1
【物件名】 図面 1
【物件名】 要約書 1

【書類名】 特許請求の範囲**【請求項 1】**

誘電率測定装置において、試料に光を照射し、該試料による該光の反射光を測定し、該反射光のスペクトルに基いて該試料の複素誘電率を求めることを特徴とする誘電率測定装置。

【請求項 2】

上記試料への入射光の位置が可変であり、上記反射光を受光する検出器の位置も可変であることを特徴とする請求項 1 に記載の誘電率測定装置。

【請求項 3】

上記試料への入射光の入射角度が可変であることを特徴とする請求項 2 に記載の誘電率測定装置。

【請求項 4】

誘電率測定方法において、試料に光を照射し、該試料による該光の反射光を測定し、該反射光のスペクトルに基いて該試料の複素誘電率を求めることを特徴とする誘電率測定方法。

【請求項 5】

上記試料は、一様な誘電率で一様な厚さの基板及び該基板の一部に薄膜が設けられていることを特徴とする請求項 4 に記載の誘電率測定方法。

【請求項 6】

上記試料の基板部分及び薄膜部分に光を照射し、それらを反射した光のスペクトルを比較することにより、該薄膜の複素誘電率を求めることを特徴とする請求項 5 に記載の誘電率測定方法。

【請求項 7】

上記照射する光は、S 偏光であることを特徴とする請求項 4 乃至 6 のいずれかに記載の誘電率測定方法。

【請求項 8】

上記照射する光は、ミリ波、テラヘルツ光、赤外光又は可視光であることを特徴とする請求項 4 乃至 7 のいずれかに記載の誘電率測定方法。

【書類名】明細書

【発明の名称】光の反射測定による試料の複素誘電率測定装置及び測定方法

【技術分野】

【0001】

本発明は、基板や基板上の薄膜に光を照射し、その反射スペクトルの変化の測定から基板や基板上の薄膜の複素誘電率を測定する装置及びその測定法に関するものである。

【背景技術】

【0002】

コンデンサーの容量測定から進化した容量法によって、数GHz以下ではLCRメータを用いて、基板上の薄膜の複素誘電率を測定できる（例えば、下記「特許文献1」参照）。容量法での高周波側の測定限界は、電極のロスの影響や、電極のインダクタンスによるLC共振の効果を補正することが困難なためである。

【0003】

高周波での複素誘電率測定では、一般に共振器法が用いられている。基板上の薄膜の複素誘電率は、その薄膜と電極から構成されたストリップラインやマイクロストリップライン等において、ネットワークアナライザーを用いて伝搬方向に対する強度と位相の変化の測定から求まる（例えば、下記「特許文献2」参照）。この方法で、0.1GHz～10GHz領域の複素誘電率測定が可能になる。ここでの高周波側の測定限界は、線路を構成する導体のロスを完全に分離、除去して薄膜だけの特性を得ることが困難なためである。

【0004】

さらに高周波領域で、基板上の薄膜の複素誘電率を測定するために、空洞共振器法が用いられている。空洞共振器中に基板上の薄膜試料を挿入した時としない時の共振周波数とQ値等をネットワークアナライザーで測定し、薄膜の複素誘電率を求めている（例えば、下記「特許文献3」参照）。この方法では、1GHz～50GHz領域の複素誘電率の測定が可能になる。ここでの高周波側の測定限界は、空洞共振器の物理的な大きさで決まっている。つまり、空洞共振器の寸法は波長程度（50GHzでは約6mm）であり、このとき空洞共振器の寸法精度が、共振器作製の工作精度とほぼ一致してしまうことである。寸法精度が低いと大きい測定誤差を生じてしまう。

【0005】

上述の容量法や共振器法では、測定器具の寸法に合わせるために、挿入する測定用試料に加工を必要とする破壊測定法であり、試料の加工には相当の手間と費用を要する。また、作製した試料の外形寸法、特に測定器具の内壁に接触する部分の寸法精度が低いと大きい測定誤差が生じ、正確な測定は困難になる。

【0006】

測定する試料に加工を加えない2つの非破壊測定法がある。一方は導波管の間に試料を挟む方法で、他方は試料に光を照射する方法である。

【0007】

2つの導波管で試料を挟み込んで、一方の開口面の反射係数及び他方の開口面の透過係数をネットワークアナライザーで測定して、これらの絶対値と位相角を、マックスウェル方程式を解くことにより導出した連立方程式に代入して、基板上の薄膜の複素誘電率を求める（例えば、下記「特許文献4」参照）。この方法は、非共振器法と呼ばれ、非破壊測定である。この方法では、1GHz～100GHz（波長で約3mm）領域の複素誘電率測定が可能になる。ここでの高周波側の測定限界は、上記段落【0004】及び【0005】と同様に、導波管の工作精度のためである。

【0008】

複素誘電率測定のためには、段落【0002】～【0007】の低周波側から高周波側に向かう『電気的測定法』とは別に、高周波側から低周波側に向かう『光学的測定法』がある。一般に、光学測定技術では、非破壊、非接触、大気圧下で複素誘電率の測定が可能である。これらの光学測定法は、自由空間法と呼ばれている。

【0009】

試料に光を照射してその時の光学的応答（反射光或いは透過光）から、複素誘電率を求める方法では、試料の厚さを d 、その屈折率を n として、測定波長を λ とすると、 nd/λ の比が小さいほど、複素誘電率の測定が困難になる。これは、光は波動であり、波の『山』と『谷』を繰り返しながら進んでいく。試料が薄くなると、例えば $nd/\lambda = 0.001$ 程度になると、試料は入射光の『山』と『谷』の間のほんの一部分としか相互作用しなくなり、試料から見ると直流の電場が作用したように見える。直流ではコンデンサーは単なる絶縁体であり、複素誘電率は実数の定数に近づく。以上のような理由で、 nd/λ の比が小さいときは、複素誘電率の測定が困難になる。

【0010】

試料に光を入射させて、その反射スペクトルを測定して薄膜の複素誘電率を求めようとする時、薄膜の厚さが薄くなり、測定波長が長くなると、その測定は困難になる。この状況の計算の結果を図2に示す。ここでは、基板と薄膜の厚さとそれらの複素誘電率は固定で、測定波長を変えたときの反射率スペクトルの計算結果である。基板 (S) の厚さと屈折率がそれぞれ $700\mu\text{m}$ と 3.4155 で、薄膜 (F) の厚さと屈折率がそれぞれ $0.4\mu\text{m}$ と 1.812 としている。各図中で実線が基板上の薄膜からなる試料の反射率スペクトル ($R(F/S)$) で、点線が基板のみの反射率スペクトル ($R(S)$) であり、これらの図ではスペクトルは約2フリンジ分のみ描いてある。図2では、薄膜の厚さ d が $0.4\mu\text{m}$ で屈折率 n が 1.812 で固定で、図2(a)は入射波長が $5\mu\text{m}$ 近傍（中赤外光）であるので $nd/\lambda = 0.14$ であり、図2(b)~(d)では、それぞれ波長を1桁ずつ長くした場合である。図2(d)は波長が 5mm 近傍で（周波数では 60GHz 近傍で）、 $nd/\lambda = 0.00014$ である。図2(c)と(d)では、基板のみの反射率スペクトル ($R(S)$) と基板上の薄膜の反射率スペクトル ($R(F/S)$) の差がほとんど無く、このままでは $0.4\mu\text{m}$ の薄膜の複素誘電率を求めることは非常に困難である。ここで、複素誘電率 (ϵ) と複素屈折率 (n) の間には、『 n の2乗が ϵ に等しい ($n^2 = \epsilon$)』の関係が成立する。単に屈折率と言う時は、複素屈折率の実数部のことである。

【0011】

自由空間法には、固定入射角度での反射係数の振幅及び位相を直接測定する方法（例えば、下記「非特許文献1」参照）や反射率の入射角度依存または反射率の試料厚さ依存または反射率の周波数依存から複素誘電率を求める方法（例えば、下記「非特許文献2」参照）がある。固定入射角度での測定法では、反射係数の振幅と位相を測定するために、ネットワークアナライザー等の高価な測定機器が必要である。入射角度を変える方法では、エネルギー反射率の測定だけであるので、ネットワークアナライザーを必要としない。しかし、両方の測定に共通して、反射率の絶対値を測定しなければならない。このためには、試料と同じ大きさの金属平板を基準試料とする必要があり、この金属平板の大きさと設置位置を被測定試料と同一にしないと測定誤差が生じるという問題がある。

【0012】

金属の基準試料を必要としない、新しい反射測定法が開発されている。試料にミリ波帯にある円偏向電磁波を照射した時の、試料によるTE波の反射係数とTM波の反射係数との比を求め、この比から複素誘電率を求める方法である（例えば、下記「特許文献5」参照）。

【0013】

段落【0011】と【0012】で述べた自由空間法での測定の感度は一般に低い。これまでのトップデータは、シリコン基板上の厚さ $d = 3.27\mu\text{m}$ の低誘電体 (Low-k) ポリマー薄膜 ($n=1.7$) に、入射角度を変えながら 925GHz ($\lambda = 324\mu\text{m}$) のサブミリ波を照射してブリュスター角度前後での反射率を測定して複素誘電率を決定している（例えば、下記「非特許文献3」参照）。この時の nd/λ の比は、 0.02 である。

【0014】

段落【0002】~【0007】で述べてきたように、電氣的測定法から出発しても、段落【0008】~【0013】で述べてきたように、光学的測定法から出発しても、周波数で $30\text{GHz} \sim 3\text{THz}$ （波長で $100\mu\text{m} \sim 10\text{mm}$ ）の間で基板上の薄膜の複素誘電率の測定は一般に困難な測定である。

【0 0 1 5】

現在通信システムに利用されている周波数帯域として、1.9GHz帯および2.45GHz帯の準マイクロ波帯域、および19GHz帯の準ミリ波帯域がある。準マイクロ波帯域は、パーソナル・ハンディ・ホン・システム（PHS）と中速無線LANの構内無線機器に割り当てられている。一方、準ミリ波帯域は高速無線LANの構内無線機器に割り当てられている。

【0 0 1 6】

さらに高周波の30GHz～3THzの領域は、今後の開発が期待される領域である。50GHz帯域のコードレス通信システムの研究開発や、60GHz帯域および76GHz帯域の衝突防止用車載レーダや、超高速無線LANの研究開発は盛んで、情報通信技術の大きな飛躍が期待されている。さらに高周波領域は、現状ではミリ波・サブミリ波天文学や核融合プラズマ研究開発の中で実用化され、重要な役割を果たしている。この高周波領域用の新しいデバイス開発のためには、この高周波領域での従来物質や新物質の複素誘電率の測定が、必要不可欠であり、重要な技術である。

【0 0 1 7】

【特許文献1】特開 2 0 0 2 - 2 8 6 7 7 1 号公報

【特許文献2】特開平 1 1 - 1 6 6 9 5 2 号公報

【特許文献3】特開 2 0 0 2 - 2 2 8 6 0 0 号公報

【特許文献4】特開 2 0 0 2 - 2 1 4 1 6 1 号公報

【特許文献5】特開 2 0 0 0 - 1 9 3 6 0 8 号公報

【非特許文献1】機能材料、Vol. 18, No10, (1998), p.47

【非特許文献2】電子情報通信学会論文誌、B-II, Vol. J80-B-II, No10, (1997), p. 906

【非特許文献3】Applied Physics Letter vol.74, (1999), 2113～2115

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0 0 1 8】

本発明は従来技術の実情に鑑みて為されたものであって、今後の製品開発の方向が30GHzより高周波側であること、およびこの周波数領域で基板上のLow-k（低誘電体；これについては段落【0 0 2 1】及び【0 0 2 2】において説明する。）薄膜の複素誘電率の測定に対する需要が大きいこと、さらにこの周波数領域で薄膜の厚さが1μm以下でも複素誘電率が測定できる技術であれば、実際の半導体産業の製造現場で*in situ*の製品管理のための装置として実用化できることから、30GHzより高周波側で基板上の薄膜の複素誘電率の測定を可能とする技術開発をめざす。しかし、実際半導体産業で使われている半導体ウェーハの平坦度は1μmより大きいために、従来のような単なる高感度複素誘電率測定装置の開発では上記の目標は達成できない。この発明では、基板と基板上の薄膜の複素誘電率の両方を同じ測定装置で測定して、薄膜の厚さが1μm以下でも複素誘電率が測定できる方法および装置を提供することを技術的課題とする。

【課題を解決するための手段】

【0 0 1 9】

基板が平行平板であれば、基板内の多重反射のために、その反射スペクトルにフリンジが現れる。このフリンジのボトム（底）周波数は、

【数 1】

$$\nu_s = \frac{cN}{2d_s \sqrt{n_s^2 - \sin^2 \theta}}$$

で表される。ここで、 c と N はそれぞれ光速と整数で、 ν_s 、 d_s 、 n_s 、 θ は、それぞれボトム周波数、基板の厚さ、基板の屈折率、入射角度である。同様に、基板上の薄膜試料にも、その反射スペクトルにフリンジが現れ、このフリンジのボトム周波数は、

【数 2】

$$\nu_f = \frac{cN}{2d_s \sqrt{n_s^2 - \sin^2 \theta} + 2d_f \sqrt{n_f^2 - \sin^2 \theta}}$$

で表される。ここで、 ν_f 、 d_f 、 n_f は、それぞれボトム周波数、薄膜の厚さ、薄膜の屈折率である。

【0020】

基板のボトム周波数からその基板に薄膜を成膜した試料でのボトム周波数の変位量 $\Delta \nu$ ($=\nu_f - \nu_s$) は、(数1) と (数2) から求まり、

【数 3】

$$\frac{\Delta \nu}{\nu_s} \approx - \frac{d_f \sqrt{n_f^2 - \sin^2 \theta}}{d_s \sqrt{n_s^2 - \sin^2 \theta}}$$

である。

【0021】

ここで、高い誘電率の薄膜の場合についてまず見積もってみる。基板が例えばシリコン ($n_s=3.4$ で $d_s=700 \mu\text{m}$) で、薄膜 (厚さ $d_f=1 \mu\text{m}$) が金属のような高い誘電率の材料では $n_f \sim 100$ 或いはそれ以上が可能である。この時、65GHz 付近のミリ波 ($\lambda=4,600 \mu\text{m}$) を垂直入射で照射した時のボトム位置の変位量は、(数3) から、 -2.7GHz と求まる。一方、(数1) からフリンジのボトム間隔は、63GHz と求まる。高い誘電率の薄膜がある時と無い時で、ボトム位置が、1 フリンジの中で約 4% ($=-2.7/63$) 低周波側へずれるのであるから、これは各々の試料の反射スペクトルを測定すれば、検出可能な量であり、 $1 \mu\text{m}$ の厚さの高い誘電率の薄膜の複素誘電率を求めることができる。ここで、 $nd/\lambda=0.02$ である。

【0022】

次に低誘電体 (Low-k) 膜の場合について見積もってみる。基板が例えばシリコン ($n_s=3.4$ で $d_s=700 \mu\text{m}$) で、薄膜 (厚さ $d_f=1 \mu\text{m}$) がシリコンの熱酸化膜 (SiO_2) のような Low-k 材料では $n_f=1.8$ である。この時、65GHz 付近のミリ波を入射角度を変えながら照射した時のボトム周波数の変位量 $\Delta \nu$ (数3) と、フリンジのボトム間隔 ν_s (数1) を求めた結果を表1にまとめる。

(表1) ピークの変位量 $\Delta \nu$ とフリンジのピーク間隔 ν_s の入射角度依存性

	0度	60度	70度	80度	85度	90度
$\Delta \nu$ (GHz)	-0.0492	-0.0447	-0.0436	-0.0430	-0.0428	-0.0428
ν_s (GHz)	63.0252	65.1749	65.5796	65.8479	65.9182	65.9419
$\Delta \nu / \nu_s$ (%)	-0.078	-0.069	-0.067	-0.065	-0.065	-0.065

Low-k 薄膜がある時と無い時で、ボトム位置が、1 フリンジの中で最大約 0.078% ($=\Delta \nu / \nu_s = -0.04916 / 63.02520$) しか低周波数側へ変位しない。このために各々の試料の反射スペクトルを測定しても、ボトム周波数の変移量を検出できず、このままでは Low-k 薄膜の複素誘電率を求めることができない。

表1の計算では、シリコンの複素屈折率の実数部が有限の値 ($n_s=3.4$) で、虚数部をゼロ ($k=0$) としているので、反射スペクトルのボトムでは反射率は 0% になっている。さらに、表1の第3行目 (ν_s) は、フリンジのボトム間隔であるが、(数1) からわかるように、これらの値は、(数1) で最初に現れるフリンジのボトム位置 ($N=1$) の周波数でもある。

【0023】

S偏向とP偏向の反射率 (R_s と R_p) の入射角度依存性を図3に示す。ここでは、シリコン基板 ($n_s=3.4$ で $d_s=700\mu\text{m}$) に60GHzのミリ波を照射した場合についての計算結果である。表1からわかるように、この60GHzの周波数の光は、この試料のフリンジのボトム周波数より低周波側にずれている。S偏向の反射率 (R_s) に注目すると、入射角度を増加させると、反射率は単調に増大して、90度で1になっている。P偏向の反射率 (R_p) でも75度付近のブリュスター角度で最小値になった後は、入射角度を増加させると、反射率は単調に増大して、90度で1になっている。

【0024】

さらに図3で、実線はシリコン基板の消衰係数 (k) がゼロ ($k=0$) で、点線は $k=0.044$ のときである。この消衰係数は、複素屈折率の虚数部のことである。反射率、特に R_s (S偏光反射率) は、入射角度が大きくなるにつれて、 k の影響をより大きく反映していることがわかる。

【0025】

段落【0022】から基板内の多重反射のために現れるフリンジのボトム周波数では入射角度に依らず、反射率は最小値 ($k=0$ では反射率は0%) をとる。一方、段落【0023】からボトム周波数からはずれた周波数では、入射角度を増加させると反射率は1に近づく。これら2つの効果が重なると、反射スペクトルは入射角度を増加させると半値幅が徐々に狭くなって、鋭いスペクトルになる。このようすを図4に示す。この図では、入射角度が、 0° (◆)、 60° (▲)、 70° (●)、 80° (■)と 85° (実線)の各角度での反射スペクトルを周波数に関してプロットしてある。

【0026】

段落【0022】の表1の第2行 ($\Delta\psi$) から、基板と基板上の薄膜では、その反射率スペクトルのボトムの周波数はずれている。特定の入射角度 (斜入射) で基板の反射スペクトル ($R(S)$) と基板上の薄膜試料の反射スペクトル ($R(F/S)$) を測定して、それらの比 (相対反射率; $R(F/S)/R(S)$) をとると段落【0025】の効果のために、最小値と最大値が隣接した曲線が得られる。このようすを図5(a)と(b)に示す。この計算では、基板をシリコン ($n_s=3.4155+i0.001$ で $d_s=700\mu\text{m}$) で薄膜をシリコンの熱酸化膜 ($n_f=1.812+i0.001$ で $d_f=20\mu\text{m}$) としている。図5(a)では、入射角度が0度、70度と85度のときの、基板上の薄膜の反射スペクトル (実線) と基板の反射スペクトル (点線) である。図5(b)は各角度で実線のスペクトルと点線のスペクトルの比である。この図では縦軸は対数で目盛ってある。相対反射スペクトルの最小値は基板上の薄膜の反射スペクトルのボトムとほぼ一致しており、相対反射スペクトル最大値は基板の反射スペクトルのボトムとほぼ一致している。ここでの計算では、基板と薄膜の両方の消衰係数 (k) をゼロではなく、 $k=0.001$ として計算した。これは、段落【0022】で述べたように、 $k=0$ では、反射率ボトムは0%になり、相対反射率を計算すると、基板の反射率ボトムの周波数で、スペクトルが発散してしまうためである。この意味の無い発散を回避するために、 $k=0.001$ と置いた。

【0027】

基板の消衰係数 k がゼロ以上の有限の値の時は、基板と基板上の薄膜の反射率スペクトルのボトムは0%より上がるが、両方で同じだけ上がるために、それらの比 (段落【0026】参照) をとると、定性的には図5(b)と同じになる。

【0028】

薄膜の消衰係数 k がゼロ以上の有限の値の時は、基板上の薄膜の反射率スペクトルのボトムが基板のそれより上がるが、基板の反射率スペクトルのボトムは変化を受けない。この結果、基板と基板上の薄膜の反射率スペクトルの比 (相対反射率; $R(F/S)/R(S)$) をとると、最大値はほぼ一定であるが、最小値は上がる。この計算結果を図6の(a)と(b)に示す。図6(a)は入射角度70度で薄膜の消衰係数を $k=0.001$ から $k=0.2$ まで変えたときの相対反射率スペクトルである。薄膜の k を変化させても、最大値はほとんど一定であるが、最小値は k が大きくなるに従い大きくなっている。図6(b)は k と最小値の関係をプロットしたものである。最小値が k の増加により大きくなるが、この増加は入射角度

にほとんどよらないことがわかる。

【0029】

薄膜の屈折率が大きくなるに従い相対反射率スペクトルは、段落[0020]の(数3)より、最大値と最小値の間の距離が大きくなることがわかる。この計算結果を図7(a)と(b)に示す。図7(a)は入射角度70度で薄膜の屈折率を $n=1.112$ から $n=3.4155$ まで変えたときの相対反射率スペクトルである。 n を大きくするに従い、最大値の位置は同じであるが、最小値は低周波側にシフトしている。図7(b)は最大値と最小値の間の間隔を薄膜の n に関してプロットしたものであるが、この間隔は n の増加により増加するが、入射角度にほとんどよらないことがわかる。

【0030】

薄膜の厚さが変化したときの相対反射率スペクトルの形状に及ぼす影響は、段落[0020]の(数3)より、薄膜の屈折率が変化したときとほぼ同じであることがわかる。この計算結果を図8(a)と(b)に示す。図8(a)は入射角度70度で薄膜の厚さを $df=1\mu\text{m}$ から $20\mu\text{m}$ まで変えたときの相対反射率スペクトルである。 df を大きくするに従い、最大値の位置は同じであるが、最小値は低周波側にシフトしている。図8(b)は最大値と最小値の間の間隔を薄膜の df に関してプロットしたものであるが、この間隔は df の増加により増加するが、入射角度にほとんどよらないことがわかる。

【発明の効果】

【0031】

上記段落[0026]～[0030]に示したように、電気的な測定に依らず光学的な測定により、薄膜の厚さが $1\mu\text{m}$ 以下であっても基板上の薄膜の複素誘電率を測定することができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0032】

以下に、発明を実施するための最良の形態を示す。

【実施例】

【0033】

本発明に係わる複素誘電率測定の実施例を図面を参照して説明する。

図1は、複素誘電率測定装置10の配置図である。光源12を出たCW光はメカニカルチョップ14で強度変調をうける。レンズ15とアパーチャー16を通過した光は平面波になる。試料11の前面でレンズ17とアパーチャー18で試料面上に集光する。この入射系30に必要な応じてポーラライザーと光パワー減衰器(この図の23)を入れる。試料を反射した光のみをアパーチャー19とレンズ20で受信して平面波にする。この光をアパーチャー21とレンズ22で受けて検出器13に集光する。光の強度信号は検出器で電気信号に変換されて計測器(この図では省略)に送られる。試料から検出器までを受光系31と呼ぶことにする。試料は試料への光の入射位置を任意に変えるために、 $x-y$ 自動ステージ(この図では省略)に載せてある。さらに試料は入射角度を変えるために、自動回転ステージ(この図では省略)に載せてあり、垂直軸(y 軸)の回りに自由に回転できる。検出器は最適の位置に設置できるように、 $x-y-z$ 自動ステージ(この図では省略)と自動回転ステージ(この図では省略)に載せてある。試料ホルダー(この図では省略)は斜入射でも入射光を遮蔽しないように工夫をしてあり、さらに試料ホルダーで反射した光が受光系に入射することを避けるために、試料ホルダーには電波吸収体(この図では省略)を取り付けてある。試料に平行光線を入射させるときには、レンズ17と20は使わない。

【0034】

直径4インチで厚さ $700\mu\text{m}$ のシリコン基板上に、厚さ $10\mu\text{m}$ の熱酸化膜(SiO_2)を両面に成膜し、次に、表裏の同じ位置の熱酸化膜を半月状に完全に除膜しシリコン面が露出した試料を準備した。この試料を図1の試料ホルダー上にセットした。S偏向の光を熱酸化膜の残っている面(上半分面)と、除膜した面(下半分面)に、斜入射(入射角度70度)で照射してその時の各々の反射スペクトルを測定し、それぞれ $R(\text{SiO}_2/\text{Si})$ と $R(\text{Si})$ と呼ぶことにする。これらの測定結果を図9(a)に示す。この図で、実線が $R(\text{SiO}_2/\text{Si})$ で、

点線が $R(\text{Si})$ であり、両方の曲線は65GHz近傍で最小値になり、65GHzより低周波側では、点線のほうが実線より大きい。しかし65GHzより高周波側では大小関係が逆転している。この結果は、図5(a)とよく一致している。次に、基板($R(\text{Si})$)試料の反射スペクトルに対する基板上の薄膜($R(\text{SiO}_2/\text{Si})$)試料の反射スペクトルの比(相対反射率= $R(\text{SiO}_2/\text{Si})/R(\text{Si})$)を求めた。この結果を図9(b)に示す。この図に表れている『最小値と最大値が隣接した曲線』は、図5(b)の計算結果と定性的に良く一致をしている。

【0035】

段落[0034]の測定結果図9(a)と(b)から、複素誘電率を求める方法を述べる。まず図9(a)で、基板(Si)上の熱酸化膜(SiO_2)付きの試料の反射スペクトルのボトム値と、基板(Si)のみの試料の反射スペクトルのボトム値が、同じであることから、段落[0028]の議論から、薄膜の消衰係数はゼロ($k=0$)と見積もられる。この結果、複素誘電率の虚数部もゼロと求まる。次に図9(b)から『最小値と最大値の間の距離』が、0.5GHzと求まった。段落[0020]の[数3]の式において、ボトム周波数、基板の厚さ、基板の屈折率、入射角度と薄膜の厚さが既知なので、薄膜の屈折率(n_f)が、 $n_f=1.3$ と求まる。

【産業上の利用可能性】

【0036】

本発明は、今後開発が期待されている高周波領域(30GHz~3THz)で、従来物質や新物質の複素誘電率の測定技術である。この領域で、新しい高周波デバイス開発のためには、薄膜の複素誘電率の測定が必要不可欠であること、さらに、本発明はこの周波数領域で薄膜の厚さが $1\mu\text{m}$ 以下でも複素誘電率が測定できる技術であるので、実際の半導体産業の製造現場で *in situ* の製品管理のための装置として実用化できる。

【図面の簡単な説明】

【0037】

【図1】複素誘電率測定装置の概念図

【図2】垂直入射での基板と基板上の薄膜の反射率スペクトルを示す図

【図3】S偏光とP偏光の反射率の入射角度依存性を示す図

【図4】入射角度を変えたときのS偏光の反射率スペクトルの周波数依存性を示す図

【図5】(a)基板と基板上の薄膜の絶対反射率スペクトルの入射角度依存性を示す図、(b)これらのスペクトルから求めた相対反射率スペクトルの入射角度依存性を示す図

【図6】(a)基板と基板上の薄膜の相対反射率スペクトルの薄膜の消衰係数依存性を示す図、(b)これらのスペクトルから求めたスペクトルの最小値を消衰係数に関してプロットした図

【図7】(a)基板と基板上の薄膜の相対反射率スペクトルの薄膜の屈折率依存性を示す図、(b)これらのスペクトルから求めたスペクトルの最大値と最小値の間の間隔を屈折率に関してプロットした図

【図8】(a)基板と基板上の薄膜の相対反射率スペクトルの薄膜の膜厚依存性を示す図、(b)これらのスペクトルから求めたスペクトルの最大値と最小値の間の間隔を薄膜の膜厚に関してプロットした図

【図9】(a)入射角度が70度での、厚さ $700\mu\text{m}$ のシリコン基板とその基板上の厚さ $20\mu\text{m}$ の SiO_2 薄膜のそれぞれの反射率スペクトルを示す図、(b)上記スペクトルの相対反射率スペクトルを示す図

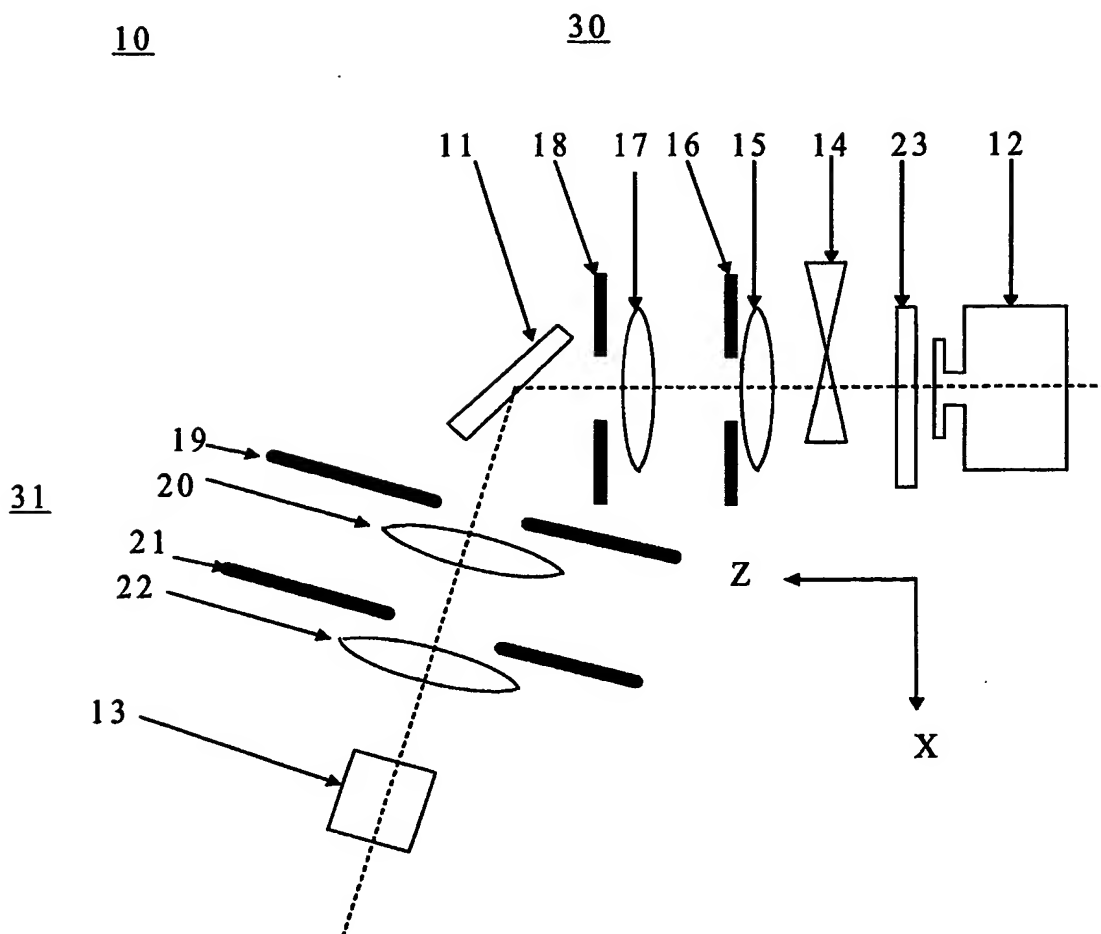
【符号の説明】

【0038】

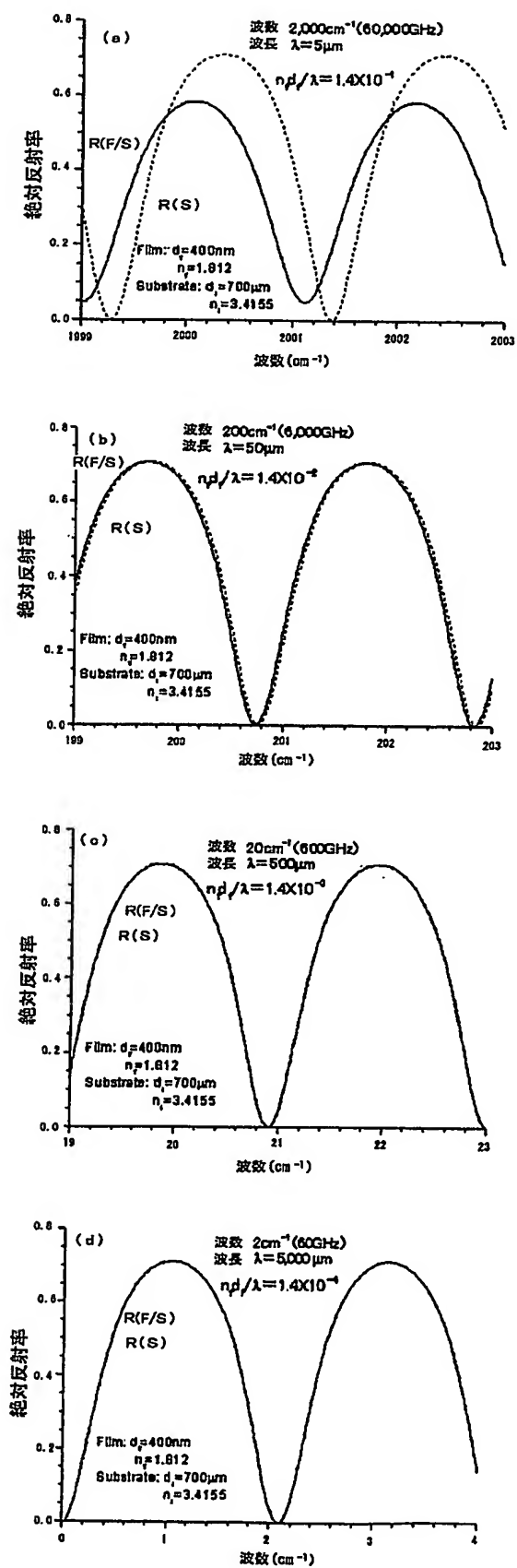
- 10 複素誘電率測定装置
- 11 試料
- 12 光源
- 13 検出器
- 14 メカニカルチョッパ

15, 17, 20, 22 レンズ
16, 18, 19, 21 アパーチャー
23 ポーラライザー／光パワー減衰器
30 入射系
31 受光系

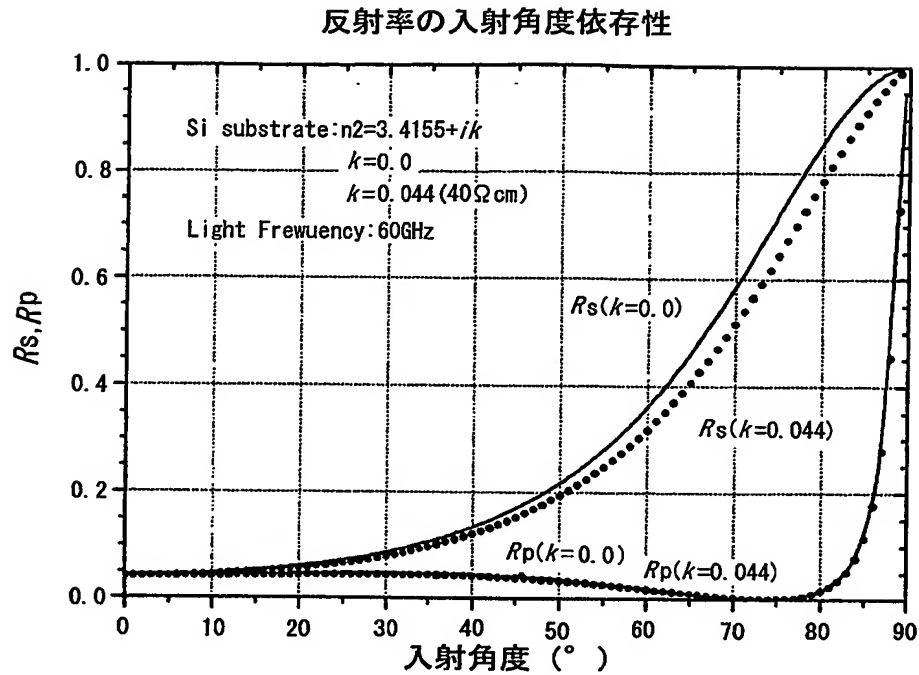
【書類名】図面
【図 1】



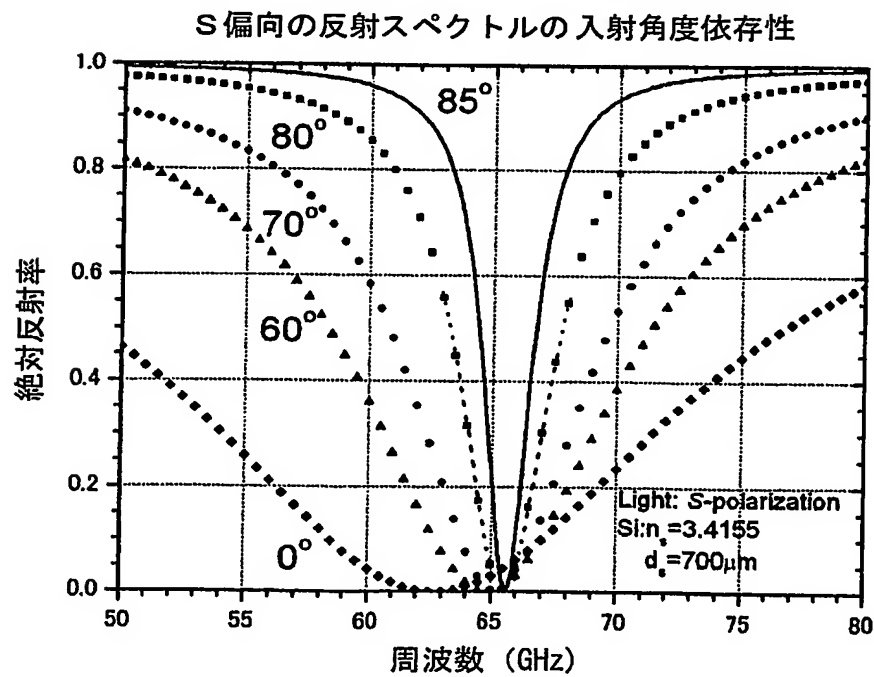
【図 2】



【図 3】



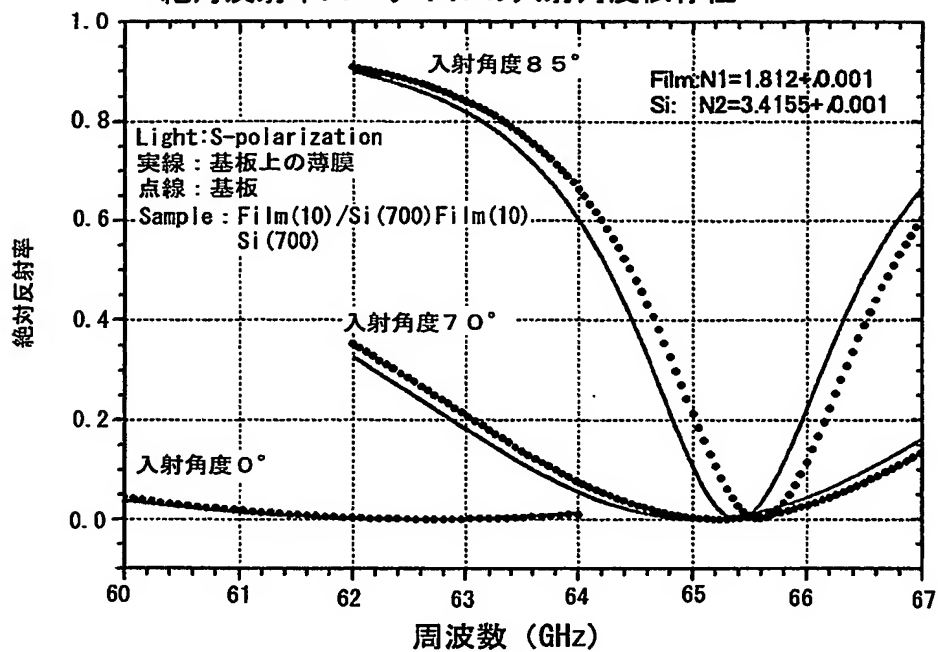
【図 4】



【図 5】

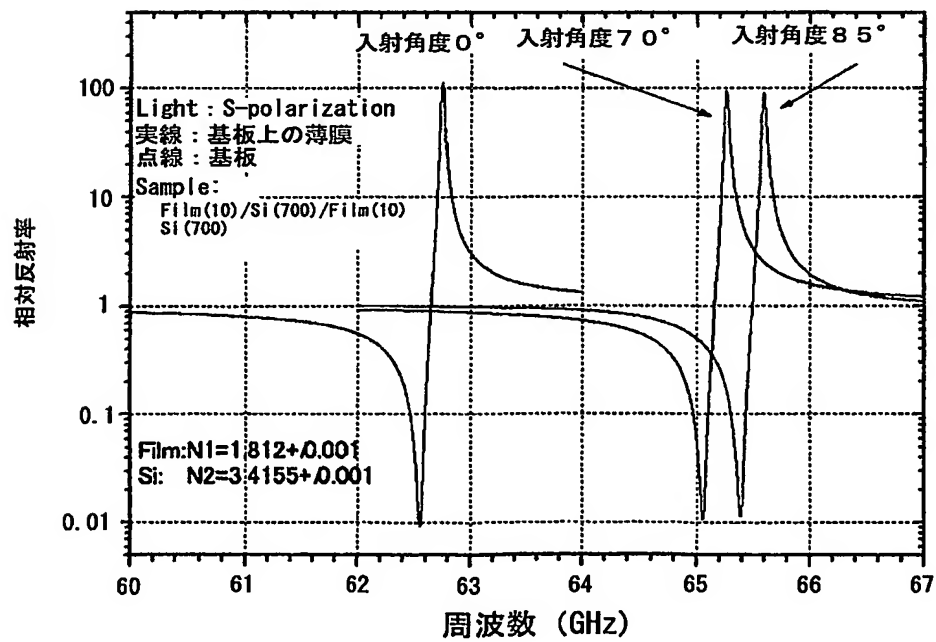
(a)

絶対反射率スペクトルの入射角度依存性



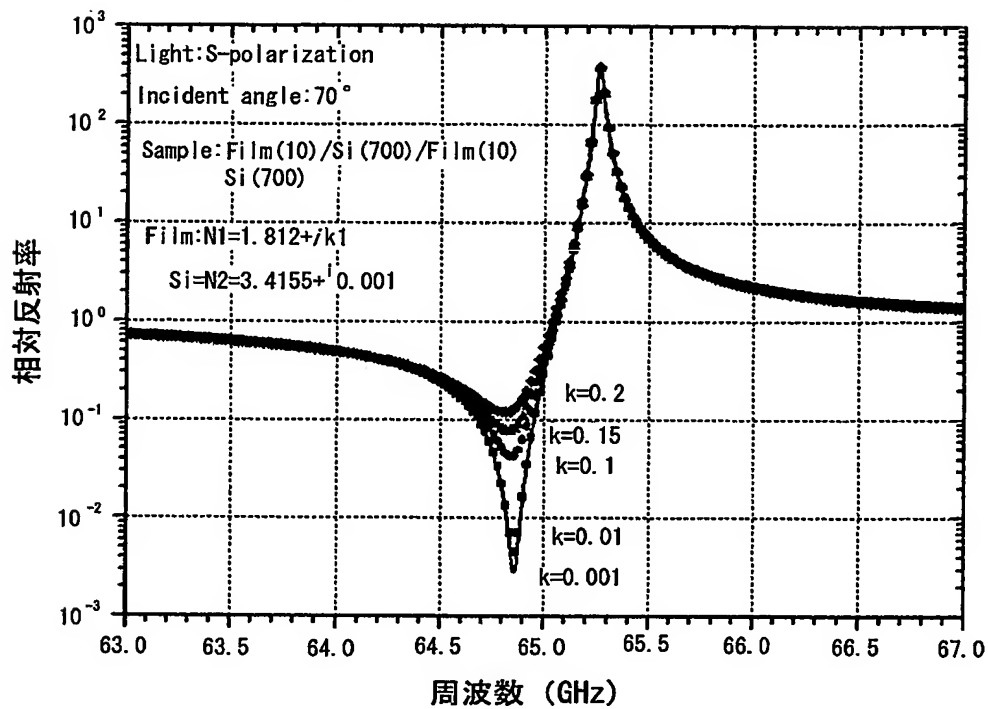
(b)

相対反射率スペクトルの入射角度依存性



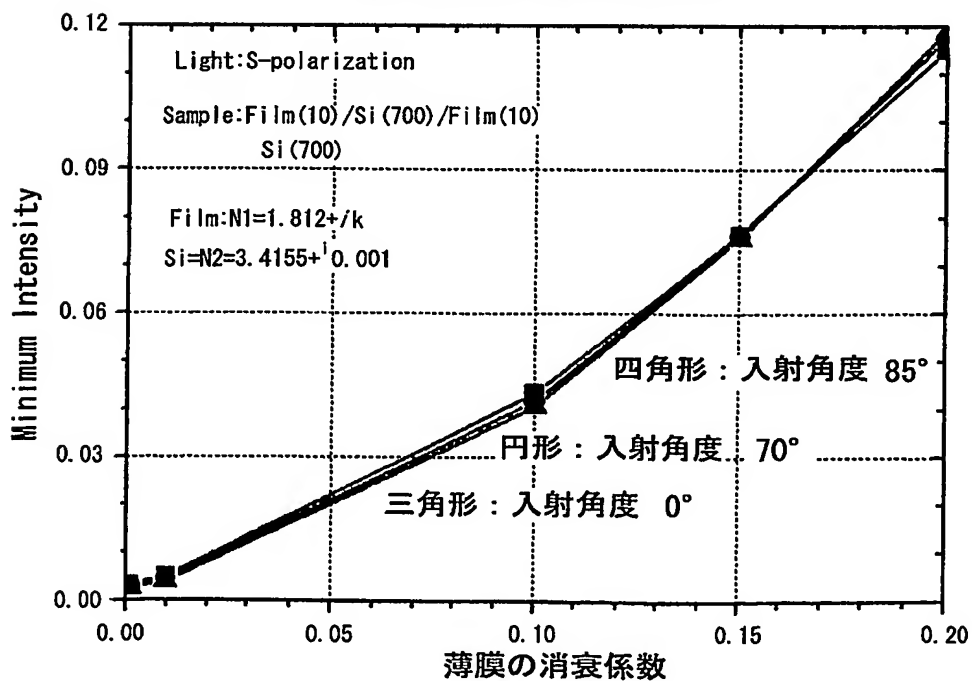
【図 6】

(a) 薄膜の消衰係数依存性 (入射角度 70度)

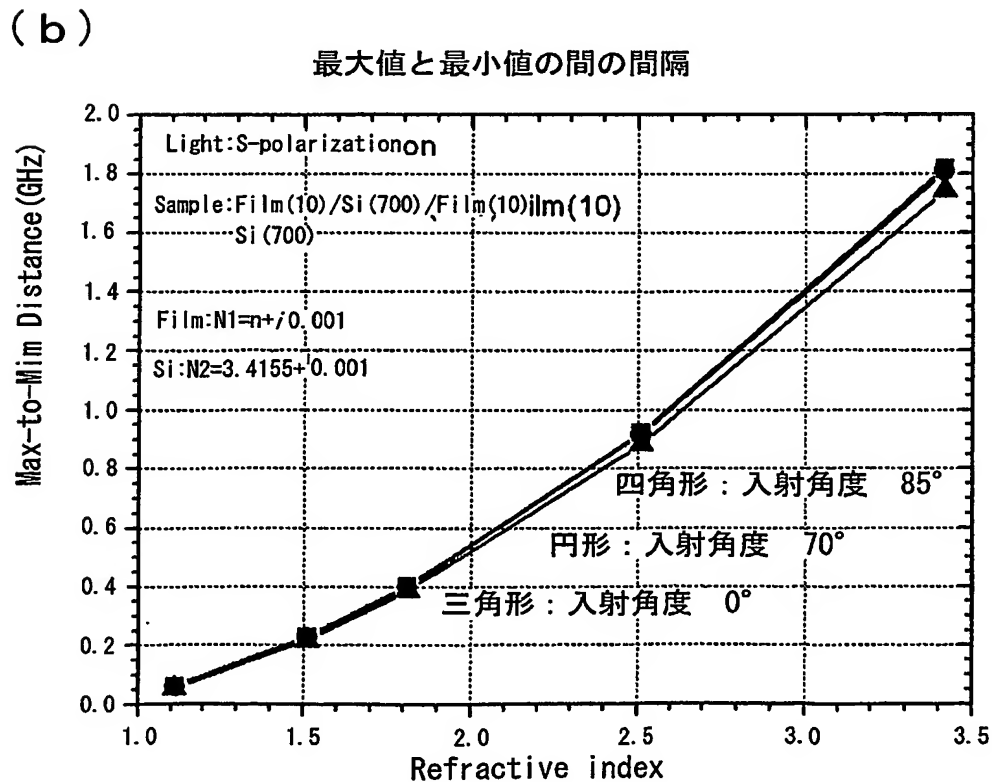
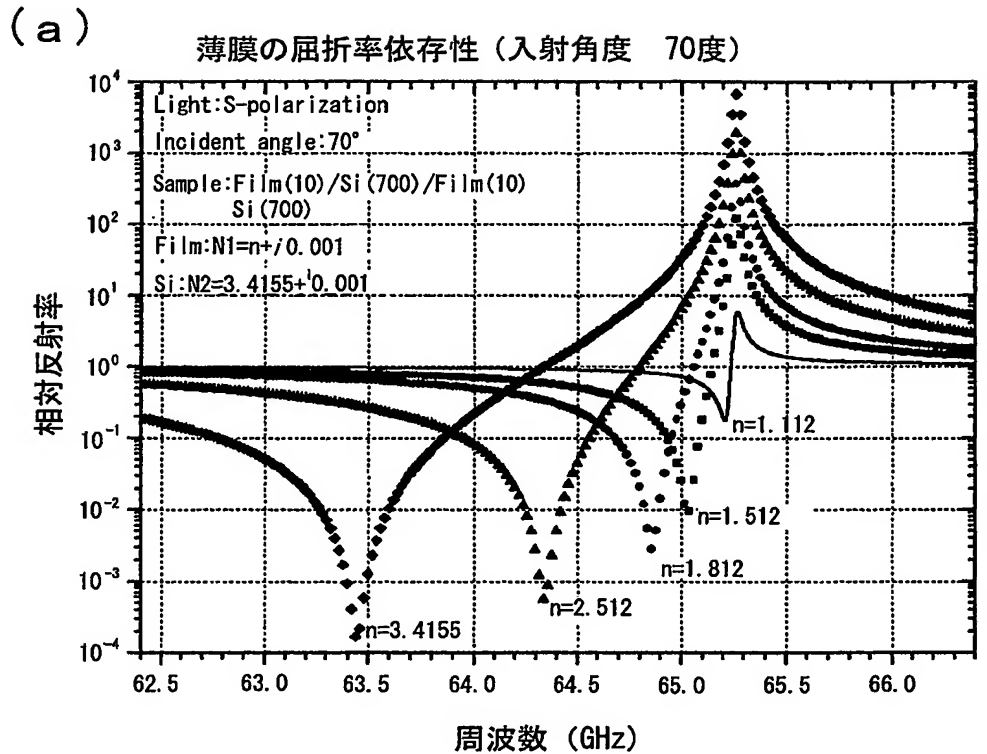


(b)

相対反射率の最小の大きさ



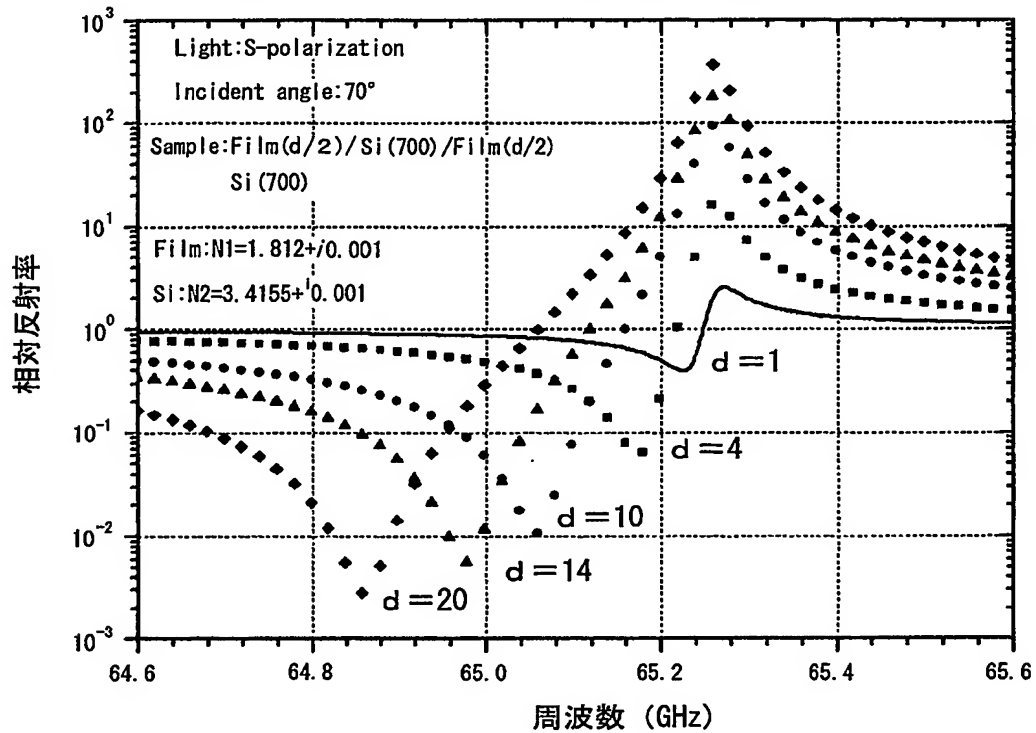
【図 7】



【図 8】

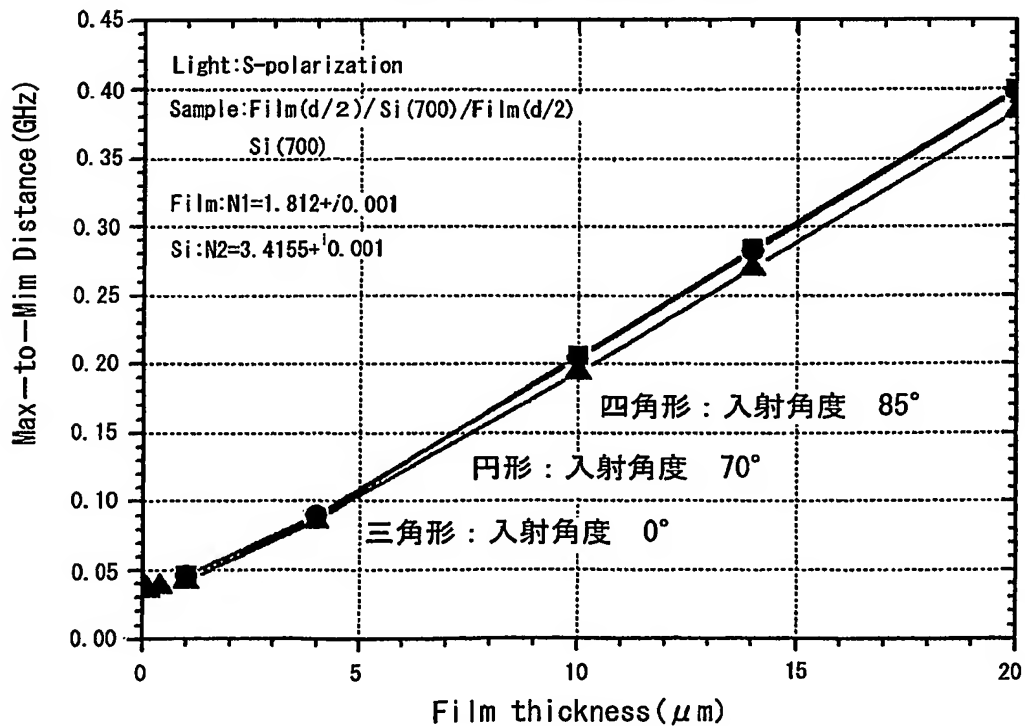
(a)

薄膜の膜厚依存性 (入射角度 70度)

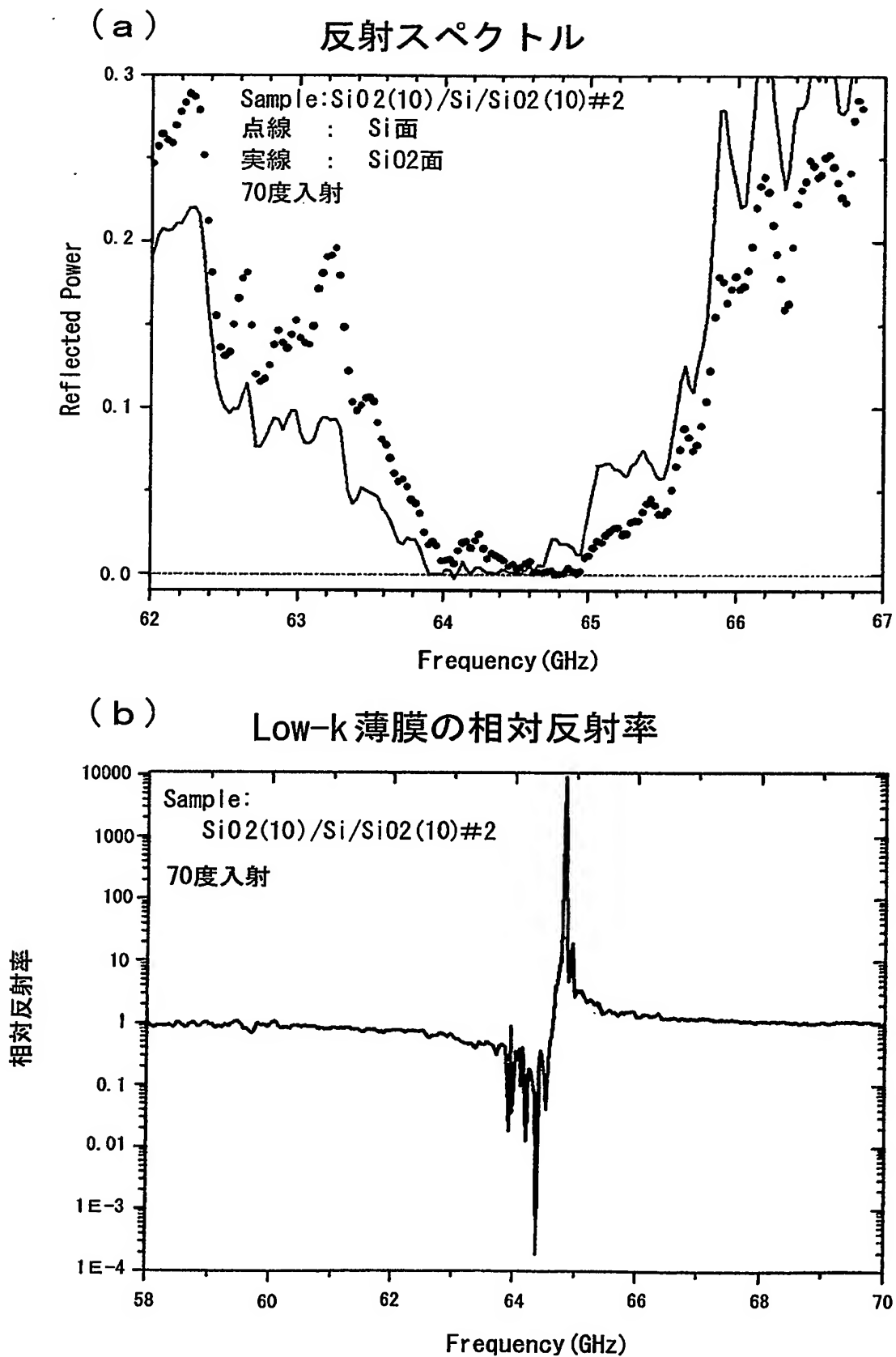


(b)

最大値と最小値の間隔



【図 9】



【書類名】 要約書

【要約】

【課題】 試料の反射スペクトルを測定することで、基板上の薄膜の複素誘電率を測定できる光学系を実現する。

【解決手段】 平行平板状の基板の反射スペクトルは、フリンジのボトム（底）周波数では入射角度に依らず、反射率は一定で最小値をとるが、その周辺周波数では、入射角度を増加させると反射率は増加して 1 に近づく。この基板に薄膜を載せて厚さを増加させると、フリンジのボトム周波数は低周波側にずれる。これら 3 つの効果のために、基板のみの反射スペクトルに対する基板と薄膜からなる系の反射スペクトルの比のスペクトル（相対反射スペクトル）は、最小値と最大値が隣接した構造のスペクトルになり、この相対反射スペクトルを解析することで、薄膜の複素誘電率が求まる。

【選択図】 図 1

認定・付加情報

特許出願の番号	特願2004-311458
受付番号	50401829036
書類名	特許願
担当官	小松 清 1905
作成日	平成16年11月 1日

<認定情報・付加情報>

【提出日】	平成16年10月26日
-------	-------------

特願 2004-311458

出願人履歴情報

識別番号

[301021533]

1. 変更年月日

2001年 4月 2日

[変更理由]

新規登録

住 所

東京都千代田区霞が関1-3-1

氏 名

独立行政法人産業技術総合研究所

This Page is Inserted by IFW Indexing and Scanning Operations and is not part of the Official Record.

BEST AVAILABLE IMAGES

Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.

Defects in the images include but are not limited to the items checked:

☒ **BLACK BORDERS**

☐ **IMAGE CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**

☐ **FADED TEXT OR DRAWING**

☐ **BLURRED OR ILLEGIBLE TEXT OR DRAWING**

☐ **SKEWED/SLANTED IMAGES**

☐ **COLOR OR BLACK AND WHITE PHOTOGRAPHS**

☐ **GRAY SCALE DOCUMENTS**

☒ **LINES OR MARKS ON ORIGINAL DOCUMENT**

☒ **REFERENCE(S) OR EXHIBIT(S) SUBMITTED ARE POOR QUALITY**

☐ **OTHER:** _____

IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.

As rescanning these documents will not correct the image problems checked, please do not report these problems to the IFW Image Problem Mailbox.